

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
23 août 2007 (23.08.2007)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2007/093641 A2

(51) Classification internationale des brevets : **Non classée**

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2007/051522

(22) Date de dépôt international :
16 février 2007 (16.02.2007)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
06 01410 17 février 2006 (17.02.2006) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **COM-
MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE** [FR/FR]; 25
rue Leblanc, Immeuble "Le Ponant D", F-75015 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **CARITU,**
Yanis [FR/FR]; La cote, F-38134 Saint Joseph de Riviere
(FR). **DAVID, Dominique** [FR/FR]; 22 chemin du Mol-
lard, F-38640 Claix (FR). **GODIN, Christelle** [FR/FR]; 6
allée des Lauriers, F-38190 Brignoud (FR).

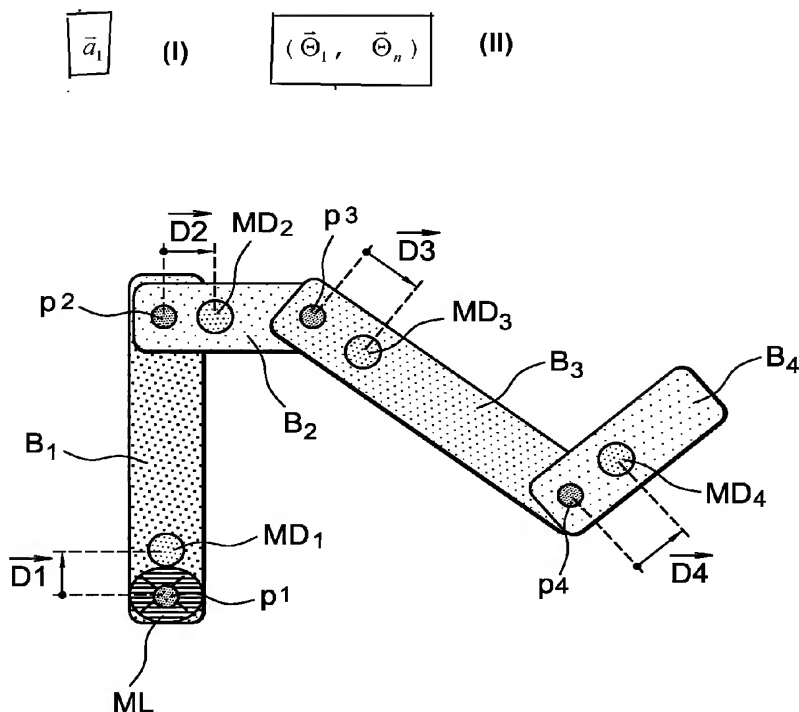
(74) Mandataire : **POULIN, Gérard**; Brevatome, 3, rue du
docteur Lancereaux, F-75008 Paris (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP,
KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT,
LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: MOTION CAPTURE DEVICE AND ASSOCIATED METHOD

(54) Titre : DISPOSITIF DE CAPTURE DE MOUVEMENT ET PROCEDE ASSOCIE



(57) Abstract: The invention relates to a motion capture device for a structure with N jointed segments, characterised by comprising: first means (ML), providing at least one piece of information which gives an absolute acceleration vector (formula I) for a point of the segment of level 1 in a reference frame at successive times t_k , k being a whole number greater than or equal to 1 and second measuring means (MD₁, MD_n) arranged on the other segments and providing a measure (M₁, M_n) for each segment from level 1 to N, at each time t_k , representing an orientation vector (formula II) for the segment in the reference frame. The invention is of application to biomechanical analysis, telemanipulation, character animation etc.

[Suite sur la page suivante]



NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT,

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) **Abrége :** L'invention concerne un dispositif de capture de mouvement d'une structure constituée de N segments articulés, caractérisé en ce qu'il comprend : - des premiers moyens (ML) qui délivrent au moins une information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue (Formule I) d'un point du segment de rang 1 dans un repère de référence, à des instants successifs t_k , k étant un nombre entier supérieur ou égal à 1, et - des seconds moyens de mesure (MD_1 , MD_n) distribués sur les différents segments et qui délivrent, pour chaque segment de rang 1 à N, à chaque instant t_k , une mesure (M_1 , M_n) représentative d'un vecteur orientation (Formule II) du segment dans le repère de référence. Application à l'analyse biomécanique, la télémanipulation, l'animation de personnages, etc.

**DISPOSITIF DE CAPTURE DE MOUVEMENT
ET PROCEDE ASSOCIE**

Domaine technique et art antérieur

5 L'invention concerne un dispositif de capture de mouvement et le procédé de capture de mouvement associé. L'invention concerne également un dispositif de reproduction de mouvement et le procédé de reproduction de mouvement associé.

10 Un dispositif de capture de mouvement d'une structure est un dispositif qui mesure des grandeurs aptes à décrire, par traitement, le mouvement de la structure. La structure peut être, par exemple, une personne ou un robot en déplacement ou non.

15 La capture du mouvement humain est une technique très utilisée dans de nombreuses applications: analyse biomécanique, télémanipulation, animation de personnage, ergonomie, etc.

 Une première catégorie de dispositifs de capture de mouvement est constituée de dispositifs qui comprennent deux parties distinctes : une première partie est placée sur l'objet en mouvement et une deuxième partie est fixe par rapport au mouvement de l'objet. Dans cette première catégorie, on distingue
20 principalement les systèmes optiques, les systèmes électromagnétiques et les systèmes à ultrasons. Ces dispositifs sont performants en termes de précision. Ils présentent toutefois un certain nombre d'inconvénients. Il est ainsi nécessaire d'installer du
25 matériel à la fois sur l'objet et dans l'environnement de l'objet. Dans tous les cas, ces systèmes ont une
30

portée réduite (en rapport à la portée de la source physique) et une phase d'installation et de calibration assez longue. Leur coût est également très élevé.

La technologie probablement la plus
5 utilisée à l'heure actuelle est basée sur l'optique, comme cela est décrit, par exemple, dans les demandes de brevet *US 2003/0215130 A1* et *US 2005/0088333 A1*. Ces systèmes permettent de reconstruire les mouvements du corps à partir d'images vues par des caméras placées
10 tout autour de la scène où se déroule l'action. Sur l'objet en mouvement sont disposées des marqueurs très visibles pour les caméras. Un traitement permet de fournir la position 3D (3D pour « à trois dimensions ») de chaque marqueur par le principe de stéréoscopie.
15 Malgré cela, les problèmes d'occlusion optique sont nombreux, ce qui rend important le nombre minimal de caméras utilisé. Certains auteurs proposent de réduire ce type de désavantages, comme cela apparaît, par exemple dans le document intitulé « *Skeleton-Based*
20 *Motion Capture for Robust Reconstruction of Human Motion* » (L.Herda ; P.Fua ; R.Plankers ; R.Boulic ; D.Thalmann, Computer Graph Lab (LIG), EPFL - web 01/2000). D'autres auteurs proposent des méthodes de traitement basées sur la silhouette extraite à partir
25 d'une seule caméra en lui associant le modèle de l'objet en mouvement (cf. « *Marker-free Kinematic Skeleton Estimation from Sequences of Volume Data* » C.Theobalt ; E.Aguiar ; M.Magnor ; H.Theisel ; H-P.Seidel ; MPI Informatik).

Les systèmes basés sur l'électromagnétisme reconstruisent les angles et les positions des capteurs disposés sur l'objet.

5 Les systèmes à ultrasons, de même que les systèmes optiques, retrouvent les positions des émetteurs. Ces deux technologies souffrent de la même limitation dans l'espace que la technologie à base de caméra.

10 Une seconde catégorie de dispositifs concerne des dispositifs en un seul bloc disposé sur le mobile. C'est le cas des dispositifs exosquelette. Ces dispositifs permettent de s'affranchir de la limitation du volume de capture mais sont contraignants puisqu'ils sont constitués de bras articulés mécaniques disposés
15 sur la structure ou la personne. La reconstruction du mouvement utilise des mesures d'angle et non de position entre les segments des membres articulés.

Plus récemment, des systèmes basés sur un principe assez ancien (le principe des centrales
20 inertiellles) ont vu le jour à des échelles plus petites que les échelles traditionnelles, typiquement de quelques centimètres de côté (cf. le brevet US 6 162 191). Ces dispositifs constitués de capteurs de vitesse angulaire (gyromètres) sont placés sur le
25 mobile ou la personne en mouvement. Les capteurs de vitesse angulaire fournissent les angles des segments en rotation à condition d'intégrer une fois la mesure, ce qui occasionne une dérive. Aux gyromètres sont parfois associés des accéléromètres, voire des
30 magnétomètres, de sorte que, dès que le mouvement est plus lent, la mesure de ces derniers, s'appuyant sur

les champs magnétiques et gravitationnels terrestres recalent l'estimation de l'orientation, annulant ainsi la dérive. La capture de mouvements rapides reste néanmoins un problème si les accélérations demeurent, car le recalage n'intervient plus. En outre, les gyromètres sont des capteurs encore difficiles à mettre en oeuvre, assez chers et présentant également une certaine sensibilité aux accélérations.

Une autre approche (cf. le brevet US 6 820 025) consiste à juxtaposer aux segments articulés des capteurs d'angle comportant des gyromètres pour reconstruire le mouvement.

La demande de brevet français FR 2 838 185 décrit un dispositif de capture de l'orientation d'un solide qui se meut dans un repère de référence. Le dispositif de capture de mouvement fournit, à partir de mesures issues de capteurs axiaux ou vectoriels placés sur le solide, au moins un angle d'orientation θ que fait le repère mobile du solide dans le repère de référence. Les capteurs utilisés sont préférentiellement un magnétomètre et un accéléromètre. Il existe alors une équation (1) entre les mesures M , le champ de gravitation G exprimé dans le repère de référence, le champ magnétique H exprimé dans le repère de référence et l'angle d'orientation θ :

$$M = F(\theta, G, H) \quad (1)$$

Les mesures M des grandeurs physiques qui sont effectuées respectivement par l'accéléromètre et par le magnétomètre sont ainsi modélisées comme une fonction F qui traduit la rotation θ du repère attaché

au solide par rapport au repère fixe dans lequel évolue le solide.

L'angle d'orientation θ est déduit de l'équation (1) par l'équation (2) suivante :

5
$$\theta = F^{-1}(M, G, H) \quad (2).$$

Si le mouvement est accéléré, une nouvelle équation (3) décrit le système, à savoir :

$$M = F(\theta, a, G, H) \quad (3).$$

10 Les inconnues θ et a forment alors un espace de dimension élevée qui interdit, de façon pratique, une inversion de la fonction F . Il n'est alors pas possible d'extraire les inconnues θ et a de l'équation (3). Sans information supplémentaire, le dispositif ne permet donc pas la mesure des angles
15 d'orientation dès lors que le mobile est accéléré ou, du moins, dès lors que l'accélération du mobile ne peut pas être négligée. Ceci représente un inconvénient.

L'invention ne présente pas les inconvénients des dispositifs mentionnés ci-dessus.

20

Exposé de l'invention

En effet, l'invention concerne un dispositif de capture de mouvement d'une structure constituée de N segments solides successifs articulés
25 les uns par rapport aux autres à partir d'un segment de rang 1 jusqu'à un segment de rang N , N étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, le segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) étant articulé avec le segment de rang $n-1$ au niveau d'un point d'articulation p_n , caractérisé
30 en ce qu'il comprend :

- des premiers moyens qui délivrent une information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 d'un point du segment de rang 1 dans un repère de référence, à des instants successifs t_k , k étant un nombre entier supérieur ou égal à 1,

- des seconds moyens de mesure fixés sur le segment de rang 1 et qui délivrent, à chaque instant t_k , une mesure représentative d'un vecteur orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de rang 1 dans le repère de référence, et

- des moyens de mesure supplémentaires fixés sur chaque segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) et qui délivrent, à chaque instant t_k , une mesure représentative d'un vecteur orientation $\vec{\Theta}_n$ du segment de rang n .

Selon une caractéristique supplémentaire de l'invention, les seconds moyens de mesure et les moyens de mesure supplémentaires sont constitués d'un accéléromètre et d'un capteur qui délivre une mesure d'un champ physique uniforme présent dans l'espace où se meut la structure et de direction connue dans le repère de référence.

Selon une autre caractéristique supplémentaire de l'invention, les seconds moyens de mesure et les moyens de mesure supplémentaires comprennent, en outre, au moins un axe gyrométrique.

Selon encore une autre caractéristique supplémentaire de l'invention, le capteur qui délivre une mesure d'un champ physique uniforme de direction connue dans le repère de référence est un magnétomètre.

Selon encore une autre caractéristique supplémentaire de l'invention, le capteur qui délivre

une mesure d'un champ physique uniforme de direction connue dans le repère de référence est une cellule photoélectrique.

5 Selon encore une autre caractéristique supplémentaire de l'invention, les premiers moyens sont constitués d'un mesureur de vitesse de sorte que l'information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue d'un point du segment de rang 1 est la vitesse du point.

10 Selon encore une autre caractéristique supplémentaire de l'invention, les premiers moyens sont constitués d'un mesureur de position de sorte que l'information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue d'un point du segment de rang 1 est la position du point.

15 L'invention concerne également un dispositif de reproduction de mouvement d'une structure constituée de N segments solides successifs articulés les uns par rapport aux autres à partir d'un segment de rang 1 jusqu'à un segment de rang N, N étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, le segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) étant articulé avec le segment de rang n-1 au niveau d'un point d'articulation p_n , caractérisé en ce qu'il comprend :

25 - un dispositif de capture de mouvement selon l'invention dans lequel les moyens de mesure supplémentaires d'un segment de rang n sont positionnés à proximité du point d'articulation p_n de telle sorte que la distance qui sépare les moyens de mesure
30 supplémentaire d'un segment de rang n du point d'articulation p_n est considérée comme nulle, et

- des moyens de calcul qui calculent, à chaque instant t_k :

a) le vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 dans le repère de référence, à partir de l'information
5 délivrée par les premiers moyens,

b) le vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de rang 1 dans le repère de référence, à partir du vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 et de la mesure représentative du vecteur orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de
10 rang 1 ;

c) un vecteur d'accélération \vec{a}_n ($n \geq 2$) du point d'articulation p_n dans le repère de référence, à partir de l'équation :

$$\vec{a}_n = \vec{a}_{n-1} + \left(\frac{d\vec{\omega}_{n-1}}{dt} \right) \wedge \vec{L}_{n-1} + \vec{\omega}_{n-1} \wedge (\vec{\omega}_{n-1} \wedge \vec{L}_{n-1})$$

15 où $\vec{\omega}_n = d(\vec{\Theta}_n)/dt$ et \vec{L}_n étant un vecteur orienté du point d'articulation p_{n-1} vers le point d'articulation p_n et dont le module a pour valeur la distance qui sépare le point d'articulation p_n du point d'articulation p_{n-1} ; et

20 d) le vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_n$ ($n \geq 2$) du segment de rang n à partir du vecteur d'accélération \vec{a}_n et de la mesure représentative de l'orientation du segment de rang n .

L'invention concerne également un
25 dispositif de reproduction de mouvement d'une structure constituée de N segments solides successifs articulés les uns par rapport aux autres à partir d'un segment de rang 1 jusqu'à un segment de rang N , N étant un nombre

entier supérieur ou égal à 2, le segment de rang n (n = 2, ..., N) étant articulé avec le segment de rang n-1 au niveau d'un point d'articulation p_n , caractérisé en ce qu'il comprend :

5 - un dispositif de capture de mouvement selon l'invention dans lequel les moyens de mesure supplémentaires d'un segment de rang n sont distants du point d'articulation p_n , et

 - des moyens de calcul qui calculent, à
10 chaque instant t_k :

 a) le vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 dans le repère de référence, à partir de l'information délivrée par les premiers moyens,

 b) le vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment
15 de rang 1 dans le repère de référence, à partir du vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 et de la mesure représentative du vecteur orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de rang 1 ;

 c) un vecteur d'accélération \vec{a}_n (n ≥ 2) du
20 point d'articulation p_n dans le repère de référence, à partir de l'équation :

$$\vec{a}_n = \vec{a}_{n-1} + \left(\frac{d\vec{\omega}_{n-1}}{dt} \right) \wedge \vec{L}_{n-1} + \vec{\omega}_{n-1} \wedge (\vec{\omega}_{n-1} \wedge \vec{L}_{n-1})$$

où $\vec{\omega}_n = d(\vec{\Theta}_n)/dt$, \vec{L}_n étant un vecteur orienté du point d'articulation p_{n-1} vers le point d'articulation p_n et
25 dont le module a pour valeur la distance qui sépare le point d'articulation p_n du point d'articulation p_{n-1} ; et

 d) le vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_n$ (n ≥ 2) et un vecteur d'accélération \vec{b}_n du point de mesure des

moyens de mesure supplémentaire fixés sur le segment de rang n à partir du vecteur d'accélération \vec{a}_n , de la mesure représentative (M_n) de l'orientation du segment de rang n, et des vecteurs d'orientation du segment de rang n à au moins deux instants qui précèdent l'instant t_k , avec \vec{b}_n tel que :

$$\vec{b}_n = \vec{a}_n + \left(\frac{d\vec{\omega}_n}{dt} \right) \wedge \vec{D}_n + \vec{\omega}_n \wedge (\vec{\omega}_n \wedge \vec{D}_n)$$

où \vec{D}_n est un vecteur orienté du point d'articulation p_n vers les moyens de mesure supplémentaires du segment de rang n et dont le module est sensiblement égal à la distance qui sépare le point d'articulation p_n des moyens de mesure supplémentaires du segment de rang n.

Selon une caractéristique supplémentaire de l'invention, des moyens de transmission radioélectrique transmettent des signaux électriques élémentaires représentatifs des mesures délivrées par les premiers moyens de mesure et les seconds moyens de mesure vers les moyens de calcul.

Selon encore une caractéristique supplémentaire de l'invention, les moyens de transmission radioélectrique comprennent une unité intermédiaire qui reçoit les signaux électriques élémentaires et qui réémet un signal électrique représentatif des signaux électriques élémentaires vers les moyens de calcul.

Selon encore une caractéristique supplémentaire de l'invention, des moyens de mémorisation mémorisent les mesures délivrées par les

premiers moyens de mesure et les seconds moyens de mesure.

Selon encore une caractéristique supplémentaire de l'invention, les moyens de
5 mémorisation sont placés sur la structure.

L'invention concerne également :

- un procédé de capture de mouvement conforme à la revendication indépendante 14,
- un procédé de reproduction de mouvement
10 conforme à la revendication indépendante 18, et
- un procédé de reproduction de mouvement conforme à la revendication indépendante 19.

Un dispositif élémentaire de mesures selon l'invention est constitué de deux types de capteurs
15 dont au moins un est un accéléromètre.

Préférentiellement, un dispositif élémentaire de mesures est réalisé à l'aide d'un dispositif de capture de mouvement de rotation de solide tel que celui décrit dans la demande de brevet
20 français publiée sous la référence FR 2 838 185 et déposée, au nom de la Demanderesse, en date du 5 avril 2002. Un dispositif élémentaire de mesures est ainsi constitué d'un couple (accéléromètre, capteur X).

Par capteur X, il faut entendre n'importe
25 quel capteur qui fournit une mesure d'un champ physique uniforme présent dans l'espace où évolue le mobile, champ physique dont la direction est connue dans le repère de référence ou qui est mesuré dans une position de référence. Les seules contraintes concernant le
30 capteur X sont, d'une part, que le capteur ne doit pas être sensible aux accélérations et, d'autre part, que

la direction du champ physique mesuré soit différente de la verticale. Le capteur X peut ainsi être un magnétomètre qui mesure la direction du champ magnétique terrestre. Le capteur X peut également être
5 une cellule photoélectrique dont la mesure est celle de l'intensité lumineuse qui arrive sur la cellule. Si, par exemple, la source d'éclairement est le soleil et que l'on connaît la date, l'heure, la longitude et la latitude lors de la mesure de l'intensité lumineuse, on
10 sait prédire l'angle d'incidence du rayon solaire dans un repère absolu et, en conséquence, la mesure est modulée en fonction de l'angle que fait le dispositif par rapport à la direction du rayon solaire. C'est donc également une autre façon de mesurer un angle. Le
15 capteur X peut encore être constitué de un ou de plusieurs axes gyrométriques qui viennent compléter la mesure de l'accéléromètre.

Les premiers moyens qui délivrent une information apte à restituer un vecteur d'accélération
20 absolue \vec{a}_i d'un point du segment de rang 1 peuvent être réalisés par un système de mesures locales. Un simple accéléromètre ne convient pas si on ne dispose pas de moyens pour compenser l'accélération de la pesanteur. Dans le cas concret de la mesure du mouvement d'une
25 personne, le système de mesure locale peut être avantageusement placé au centre de masse ou à proximité du centre de masse du corps de la personne (à la ceinture, par exemple).

Le système de mesures locales peut être,
30 par exemple, un dispositif de type GPS (GPS pour « Global Positioning System ») associé à un dérivateur.

Le dispositif GPS permet de connaître à tout instant la position de l'élément qui le porte et un dérivateur, en dérivant deux fois la donnée de position, détermine l'accélération absolue dans le repère géographique.

5 Le système de mesures locales peut également être réalisé à l'aide d'un dispositif de radio localisation associé à un dérivateur. Les dispositifs de radio localisation nécessitent l'utilisation de balises (radar ULB (ULB pour « Ultra
10 Large Bande », balise optique, etc.). Les dispositifs de radio localisation font donc perdre le caractère autonome du système de mesures locales. Ils se révèlent toutefois d'utilisation très avantageuse lors de suivis de mouvements dans une enceinte où des balises sont
15 préalablement positionnées. L'utilisation de systèmes radio présente également le double avantage de la transmission des données et de la mesure de position (c'est particulièrement le cas des dispositifs ULB). De même que dans le cas du dispositif GPS, la mesure de
20 position délivrée par le dispositif de radio localisation est dérivée deux fois pour obtenir la mesure d'accélération.

 Une mesure de pression orientée (tube) est directement corrélée à la vitesse d'un corps dans
25 l'air. Il est ainsi possible de déterminer, selon trois axes, le vecteur vitesse d'un segment sur lequel est fixé un mesureur de pression. En dérivant une fois la mesure de vitesse, on obtient l'accélération.

 Le dispositif de capture de mouvement peut
30 avantageusement être « dynamique » au niveau de la structure hiérarchique de la structure en mouvement.

Dans le cas, par exemple, d'une structure humanoïde (personne ou robot), cela signifie que le (les) système(s) de mesure locale ML peut (peuvent) être placé(s) indifféremment au niveau du pied, de la main, de la taille, etc., ou de tout autre partie du corps assimilable à un élément rigide.

Dans d'autres modes de réalisation de l'invention, les premiers moyens qui délivrent une information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 d'un point du segment de rang 1 ne sont pas des moyens de mesures. Dans le cas où il est connu qu'un point d'un segment est fixe dans le repère de référence, il est en effet inutile d'effectuer une mesure d'accélération sur ce segment. Ce segment peut alors avantageusement être choisi comme étant le segment de rang 1. Les premiers moyens qui délivrent l'information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 d'un point du segment de rang 1 peuvent alors être, par exemple, des moyens de stockage qui ont la connaissance de la position fixe occupée par un point du segment de rang 1 dans le repère de référence.

A titre d'exemple non limitatif, dans la suite de la description, les premiers moyens qui délivrent une information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 sont des moyens de mesure ML fixés sur le segment de rang 1. Les moyens de mesure ML seront considérés comme superposés aux seconds moyens de mesure MD₁ qui sont également fixés sur le segment de rang 1. Dans un cas plus général, les moyens de mesure ML et MD₁ sont distants les uns des autres, la

position des moyens de mesure ML étant alors assimilable à un point d'articulation virtuel entre le segment de rang 1 et un segment virtuel de rang zéro.

Un dispositif de mesure MD peut
5 caractériser un état de repos. La variance des signaux délivrés par le dispositif MD est alors inférieure à un seuil. Dès lors qu'un état de repos est détecté en un point, il existe une très forte probabilité pour que ce point soit au repos dans le repère fixe de référence
10 (en effet, bien qu'un mouvement rectiligne uniforme donne le même résultat qu'un état de repos, un tel mouvement est peu probable et difficile à maintenir). Dans le cas d'un repos détecté, l'accélération de la structure est nulle et l'état de repos peut être
15 détecté.

Toutefois, il y a des cas où une articulation est au repos dans un mouvement particulier. C'est le cas, par exemple, de la marche où chaque pied se trouve être momentanément au repos de
20 façon alternée. Dans ce cas, le procédé de l'invention s'applique de façon que le segment de rang 1 soit, alternativement, le pied droit ou le pied gauche.

Dans la suite de la description, l'invention sera décrite pour la capture et la
25 reproduction du mouvement d'une structure articulée constituée d'une succession de segments. Cependant, il est clair que l'invention s'applique également à tout corps solide non articulé et de forme quelconque (celui-ci peut alors être identifié au segment de rang
30 1 de la structure articulée décrite) ou encore à une

structure articulée complexe constituée de plusieurs ensembles de segments articulés.

Brève description des dessins

5 D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture d'un mode de réalisation préférentiel fait en référence aux figures jointes parmi lesquelles :

- la figure 1 représente, de manière
10 symbolique, un exemple de structure articulée concernée par le dispositif de capture de mouvement de l'invention ;

- la figure 2 représente un exemple de
dispositif de capture de mouvement selon l'invention
15 dans le cas d'une structure à quatre segments articulés ;

- la figure 3 représente deux segments articulés successifs munis d'un dispositif de capture de mouvement selon l'invention ;

20 - la figure 4A représente des étapes essentielles d'un cas particulier du procédé de traitement de mesures mis en œuvre dans le cadre de l'invention ;

- la figure 4B représente, dans le cas
25 général, des étapes essentielles du procédé de traitement de mesures mis en œuvre dans le cadre de l'invention ;

- la figure 5A représente un organigramme détaillé d'une étape essentielle du procédé de
30 traitement de mesures représenté en figure 4A ;

- la figure 5B représente un organigramme détaillé d'une étape essentielle du procédé de traitement de mesures représenté en figure 4B ;

5 - la figure 6A illustre, de façon symbolique, dans le cas particulier mentionné ci-dessus, l'évolution au cours du temps des données d'accélération et d'orientation obtenues pour les différents segments d'une structure à cinq segments articulés ;

10 - la figure 6B illustre, dans le cas général, les résultats de calcul, de proche en proche, des données d'accélération et d'orientation obtenues pour les différents segments d'une structure à segments articulés ;

15 - les figures 7A et 7B représentent deux modes de réalisation d'un dispositif de reproduction de mouvement selon l'invention.

 Sur toutes les figures, les mêmes références représentent les mêmes éléments.

20

Description détaillée de modes de mise en œuvre de l'invention

25 La figure 1 représente un exemple de structure articulée concernée par le dispositif de capture de mouvement de l'invention.

30 La structure, par exemple un corps humain ou un robot humanoïde, est décomposée en un ensemble de segments qui sont autant d'éléments solides articulés les uns par rapport aux autres. L'ensemble des segments se décompose ainsi en un segment de tête TE, un segment de cou C, un ensemble de segments de tronc T1, T2, T3,

un ensemble de segments de bras gauche BG1, BG2, BG3, BG4, un ensemble de segments de bras droit BD1, BD2, BD3, BD4, un ensemble de segments de jambe gauche JG1, JG2, JG3, JG4, JG5 et un ensemble de segments de jambe droite JD1, JD2, JD3, JD4, JD5.

La figure 2 représente une structure articulée munie d'un dispositif de capture de mouvement selon l'invention. La structure est, par exemple, un bras de robot constitué de quatre segments articulés B₁, B₂, B₃, B₄ allant de l'épaule jusqu'à la main.

Le segment B₁ est muni d'un système de mesures locales ML et d'un dispositif élémentaire de mesures d'orientation MD₁. Le dispositif élémentaire de mesures d'orientation MD₁ est distant du système de mesures locales ML. Le point de fixation du système de mesures locales ML et le point de fixation du dispositif élémentaire de mesures d'orientation MD₁ définissent un vecteur \vec{D}_1 de module D₁ et orienté de ML vers MD₁. Comme cela a été mentionné précédemment, lorsqu'un point du segment de rang 1 est fixe, le système de mesure locale ML est inutile puisqu'il est alors connu que l'accélération de ce point est nulle dans le repère de référence.

Chaque segment B_n (n = 2, 3, 4) est muni d'un point d'articulation p_n où s'articule le segment voisin B_{n-1}. Un dispositif élémentaire de mesures d'orientation MD_n est placé sur chaque segment B_n. Le point de fixation du dispositif élémentaire de mesures d'orientation MD_n est distant du point d'articulation p_n, le point de fixation du dispositif élémentaire de mesures d'orientation MD_n et le point d'articulation p_n

définissant un vecteur \vec{D}_n de module D_n et orienté de p_n vers MD_n .

Le dispositif de reproduction de mouvement de l'invention a pour fonction d'estimer, de proche en proche, à partir de la connaissance de l'accélération et de l'orientation du premier segment B_1 , l'accélération des points d'articulation successifs des différents segments ainsi que les angles que font les différents segments entre eux.

Dans les schémas et discussions ci-dessous, n est l'indice générique, ou rang, d'un segment, k est un indice générique d'incrémentement du temps, a_n est l'accélération du point d'articulation p_n du segment de rang n dans un repère fixe de référence et θ_n est l'orientation en trois dimensions (orientation 3D) du segment de rang n dans le repère fixe. Pour des raisons de commodité, les accélérations a_n et orientations θ_n sont le plus souvent notées sous forme scalaire dans la demande de brevet. Il faut cependant noter que toutes ces grandeurs sont des vecteurs de dimension trois dans le repère de référence.

La figure 3 représente une vue de détail d'une structure en mouvement équipée d'un dispositif de capture de mouvement de l'invention. Un segment S_n est articulé avec un segment S_{n-1} en un point d'articulation p_n . La longueur du segment S_n est assimilée à la distance L_n qui sépare le point d'articulation p_{n+1} du point d'articulation p_n . De même, la longueur du segment S_{n-1} est assimilée à la distance L_{n-1} qui sépare le point d'articulation p_n du point d'articulation p_{n-1} . Les points d'articulation p_{n-1} et p_n définissent un

vecteur \vec{L}_n orienté de p_{n-1} vers p_n et dont le module est égal à la distance qui sépare les points d'articulation p_n et p_{n-1} . Le point d'articulation p_n a une accélération a_n et le point d'articulation p_{n-1} a une accélération a_{n-1} . Les points de mesure des dispositifs MD_n et MD_{n-1} sur les segments respectifs de rang n et $n-1$ ont les accélérations respectives b_n et b_{n-1} .

Dans la suite de la description, l'invention sera présentée, d'une part, dans le cas particulier où les vecteurs \vec{D}_n sont négligeables (les vecteurs \vec{D}_n sont alors considérés comme des vecteurs nuls) et, d'autre part, dans le cas général où les vecteurs \vec{D}_n ne sont pas considérés comme négligeables.

La figure 4A représente le principe général de détermination des grandeurs \vec{a}_n et $\vec{\Theta}_n$ selon l'invention dans le cas particulier où les vecteurs \vec{D}_n sont nuls. L'accélération \vec{a}_n du point d'articulation p_n est calculée à partir de l'accélération \vec{a}_{n-1} du point d'articulation p_{n-1} , du vecteur \vec{L}_{n-1} qui représente le segment de rang $n-1$ et du vecteur $\vec{\Theta}_{n-1}$ qui représente le vecteur orientation 3D du segment de rang $n-1$. Il vient, conformément à la loi de composition des mouvements :

$$\vec{a}_n = \vec{a}_{n-1} + \left(\frac{d\vec{\omega}_{n-1}}{dt} \right) \wedge \vec{L}_{n-1} + \vec{\omega}_{n-1} \wedge (\vec{\omega}_{n-1} \wedge \vec{L}_{n-1}) \quad (4)$$

dans laquelle :

- le symbole « \wedge » représente l'opérateur « produit vectoriel », et

$$- \vec{\omega}_{n-1} = d(\vec{\Theta}_{n-1})/dt$$

L'accélération \vec{a}_n étant une grandeur connue, il est alors possible de calculer l'orientation $\vec{\Theta}_n$ sur la base de l'équation (5) :

$$5 \quad \vec{\Theta}_n = F^{-1} (M_n, \vec{a}_n, G, H) \quad (5)$$

dans laquelle :

- M_n représente les mesures délivrées par le dispositif élémentaire de mesures MD_n placé sur le segment de rang n , et

10 - G et H sont respectivement le champ de gravitation et le champ magnétique mesurés dans le repère de référence, au niveau du segment de rang n .

L'équation (5) est une équation connue en soi qui correspond à l'équation (2) rappelée ci-dessus.

15 La figure 4B représente, dans le cas général, les étapes essentielles du procédé de traitement de mesures mis en œuvre dans le cadre de l'invention. Dans le cas général, l'équation qui relie l'accélération \vec{b}_n du point de mesure du dispositif MD_n

20 et $\vec{\Theta}_n$ s'écrit :

$$\vec{b}_n = \vec{a}_{n-1} + \left(\frac{d\vec{\omega}_{n-1}}{dt} \right) \wedge \vec{L}_{n-1} + \vec{\omega}_{n-1} \wedge (\vec{\omega}_{n-1} \wedge \vec{L}_{n-1}) + \left(\frac{d\vec{\omega}_n}{dt} \right) \wedge \vec{D}_n + \vec{\omega}_n \wedge (\vec{\omega}_n \wedge \vec{D}_n)$$

ou encore :

$$\vec{b}_n = \vec{a}_n + \left(\frac{d\vec{\omega}_n}{dt} \right) \wedge \vec{D}_n + \vec{\omega}_n \wedge (\vec{\omega}_n \wedge \vec{D}_n)$$

25 Il est alors possible d'écrire la grandeur $b_n(t_k)$ sous la forme suivante :

$$b_n(t_k) = K(\vec{a}_n(t_k), \vec{\Theta}_n(t_{i < k}), \vec{\Theta}_n(t_k))$$

Le vecteur \vec{a}_n est alors calculé à l'aide de l'équation (4) comme il l'était précédemment, dans le cas particulier décrit ci-dessus. Ensuite, les vecteurs \vec{b}_n et $\vec{\Theta}_n$ sont calculés, à un instant t_k , à l'aide de l'équation (6) telle que :

$$\vec{\Theta}_n(t_k) = L^{-1} (M_n(t_k), \vec{a}(t_k), G, H, \vec{\Theta}_n(t_{i < k})) \quad (6)$$

où la fonction L est une fonction qui combine les fonction F et K de telle sorte que :

$$\begin{aligned} M_n(t_k) &= F(\vec{b}_n(t_k), G, H, \vec{\Theta}_n(t_k)) \\ &= F[K(\vec{a}_n(t_k), \vec{\Theta}_n(t_{i < k}), \vec{\Theta}_n(t_k)), G, H, \vec{\Theta}_n(t_k)] \\ &= L(\vec{a}_n(t_k), G, H, \vec{\Theta}_n(t_k), \vec{\Theta}_n(t_{i < k})) \end{aligned}$$

La figure 5A représente un organigramme détaillé d'une étape essentielle du procédé de traitement de mesures représenté en figure 4A.

Le bloc de traitement représenté en figure 5A détaille le calcul des grandeurs $a_n(t_k)$ et $\theta_n(t_k)$ qui sont associées, à un instant t_k , au segment de rang n. Les grandeurs $a_n(t_k)$ et $\theta_n(t_k)$ du segment de rang n sont déterminées à partir des données mesurées ou calculées suivantes :

- les accélérations $a_{n-1}(t_k)$, $a_{n-1}(t_{k-1})$ et $a_{n-1}(t_{k-2})$ relatives au segment de rang n-1, calculées pour trois instants différents t_k , t_{k-1} , t_{k-2} , et
- les mesures $M_{n-1}(t_{k-1})$ et $M_{n-1}(t_{k-2})$ délivrées, par le dispositif élémentaire de mesures MD_{n-1} , aux deux instants différents t_{k-1} et t_{k-2} ,
- l'orientation $\theta_{n-1}(t_k)$ du segment de rang n-1 calculée à l'instant t_k , et
- les mesures $M_n(t_k)$ délivrées par le dispositif élémentaire de mesures MD_n à l'instant t_k .

Les grandeurs $a_{n-1}(t_{k-2})$ et $M_{n-1}(t_{k-2})$ sont appliquées à un opérateur 2 qui met en œuvre l'équation (5) et délivre l'orientation $\theta_{n-1}(t_{k-2})$. De même, les grandeurs $a_{n-1}(t_{k-1})$ et $M_{n-1}(t_{k-1})$ sont appliquées à un opérateur 2 qui met en œuvre l'équation (5) et délivre l'orientation $\theta_{n-1}(t_{k-1})$.

Les grandeurs $\theta_{n-1}(t_{k-2})$ et $\theta_{n-1}(t_{k-1})$ et l'information d'intervalle de temps Δt_{21} telle que :

$$\Delta t_{21} = t_{k-2} - t_{k-1}$$

sont ensuite appliquées à un opérateur différentiateur DIFF qui calcule la grandeur $\omega_{n-1}(t_{k-1})$ telle que :

$$\omega_{n-1}(t_{k-1}) = (\theta_{n-1}(t_{k-2}) - \theta_{n-1}(t_{k-1})) / \Delta t_{21}.$$

Les grandeurs $\omega_{n-1}(t_k)$ et $d(\omega_{n-1}(t_k))/dt$ sont ensuite calculées :

- la grandeur $\omega_{n-1}(t_k)$ est calculée à l'aide d'un opérateur différentiateur DIFF de sorte que : $\omega_{n-1}(t_k) = (\theta_{n-1}(t_{k-1}) - \theta_{n-1}(t_k)) / \Delta t_{10}$, où $\theta_{n-1}(t_{k-1})$ est la grandeur calculée ci-dessus, $\theta_{n-1}(t_k)$ est connu (calculé précédemment), et $\Delta t_{10} = t_{k-1} - t_k$, et

- la grandeur $d(\omega_{n-1}(t_k))/dt$ est calculée à l'aide d'un opérateur différentiateur DIFF de sorte que : $d(\omega_{n-1}(t_k)) / dt = (\omega_{n-1}(t_{k-1}) - \omega_{n-1}(t_k)) / \Delta t_{10}$, où $\omega_{n-1}(t_{k-1})$ et $\omega_{n-1}(t_k)$ sont les grandeurs calculées ci-dessus, et $\Delta t_{10} = t_{k-1} - t_k$.

Les grandeurs $a_{n-1}(t_k)$, $\omega_{n-1}(t_k)$ et $d(\omega_{n-1}(t_k))/dt$ sont alors appliquées à un opérateur 1 qui met en œuvre l'équation (4) et délivre la grandeur $a_n(t_k)$. La grandeur calculée $a_n(t_k)$ et la mesure connue prélevée $M_n(t_k)$ sont ensuite appliquées à un opérateur 2 qui met en œuvre l'équation (5) et délivre la grandeur d'orientation $\theta_n(t_k)$.

Le traitement des mesures acquises par le dispositif de capture de mouvement articulé de l'invention conduit à la détermination, pour chaque segment de la structure en mouvement, de son accélération au point d'articulation et de son orientation dans un repère de référence. Il est alors possible de décrire le mouvement de la structure, par exemple sur un écran.

Comme cela apparaît clairement en référence à la figure 5A, la détermination du couple $[a_n(t_k), \theta_n(t_k)]$ d'un segment de rang n à l'instant t_k est déduite, entre autres, d'informations relatives au segment de rang $n-1$ aux instants antérieurs t_{k-1} et t_{k-2} . En conséquence, il est clair que l'ensemble des données d'accélération et d'orientation relatives à l'ensemble des segments de la structure ne peut pas être connu dès la première mesure. Il est ainsi nécessaire d'acquérir un certain nombre de mesures avant que le mouvement articulé ne puisse être reproduit dans sa totalité.

La figure 5B représente un organigramme détaillé d'une étape essentielle du procédé de traitement de mesures représenté en figure 4B.

En plus des données mentionnées en référence à la figure 5A, les grandeurs $\vec{a}_n(t_k)$ et $\vec{\Theta}_n(t_k)$ relatives au segment de rang n sont ici également déterminées à partir des orientations $\theta_n(t_{k-1})$ et $\theta_n(t_{k-2})$ calculées, pour le segment n , aux instants t_{k-1} et t_{k-2} .

Les grandeurs $a_{n-1}(t_{k-2})$, $\theta_{n-1}(t_{k-3})$, $\theta_{n-1}(t_{k-4})$ et $M_{n-1}(t_{k-2})$ sont alors appliquées à un opérateur 2 qui met en œuvre l'équation (6) et délivre l'orientation $\theta_{n-1}(t_{k-2})$. De même, les grandeurs $a_{n-1}(t_{k-1})$, $\theta_{n-1}(t_{k-2})$, $\theta_{n-1}(t_{k-3})$ et $M_{n-1}(t_{k-1})$ sont appliquées à un opérateur 3 qui met en œuvre l'équation (6) et délivre l'orientation $\theta_{n-1}(t_{k-1})$.

$1(t_{k-3})$ et $M_{n-1}(t_{k-1})$ sont appliquées à un opérateur 2 qui met en œuvre l'équation (6) et délivre l'orientation $\theta_{n-1}(t_{k-1})$.

Les grandeurs $a_{n-1}(t_k)$, $\omega_{n-1}(t_k)$ et $d(\omega_{n-1}(t_k))/dt$ sont alors appliquées à un opérateur 1 qui met en œuvre l'équation (4) et délivre la grandeur $a_n(t_k)$. Les orientations $\theta_n(t_{k-1})$ et $\theta_n(t_{k-2})$ estimées aux deux instants précédents l'instant t_k , la grandeur calculée $a_n(t_k)$ et la mesure connue prélevée $M_n(t_k)$ sont ensuite appliquées à un opérateur 2 qui met en œuvre l'équation (6), où $\omega_n(t_k)$ et $d\omega(t_k)$ sont données comme précédemment par l'opérateur DIFF :

$$\omega_n(t_k) = (\theta_n(t_{k-1}) - \theta_n(t_k)) / \Delta t \quad 10$$

$$d(W_n(t_k)) / dt = (W_n(t_{k-1}) - W(t_k)) / \Delta t \quad 10$$

où

$$W_n(t_{k-1}) = (\theta_n(t_{k-2}) - \theta_n(t_{k-1})) / \Delta t \quad 21$$

L'opérateur 2 délivre alors la grandeur d'orientation $\theta_n(t_k)$.

Le traitement des mesures acquises par le dispositif de capture de mouvement articulé de l'invention conduit à la détermination, pour chaque segment de la structure en mouvement, de son accélération au point d'articulation et de son orientation dans un repère de référence. Il est alors possible de décrire le mouvement de la structure, par exemple sur un écran.

Comme cela apparaît clairement, par exemple en référence à la figure 5A, la détermination du couple $[a_n(t_k), \theta_n(t_k)]$ d'un segment de rang n à l'instant t_k est déduite, entre autres, d'informations relatives au segment de rang $n-1$ aux instants antérieurs t_{k-1} et t_{k-2} .

En conséquence, il est clair que l'ensemble des données d'accélération et d'orientation relatives à l'ensemble des segments de la structure ne peut pas être connu dès la première mesure. Il est ainsi nécessaire d'acquérir
5 un certain nombre de mesures avant que le mouvement articulé ne puisse être reproduit dans sa totalité.

De même, dans le cas général où les vecteurs \vec{D}_n ne sont pas considérés comme nuls, il faut connaître deux orientations successives précédentes du
10 segment de rang n pour initialiser le procédé. Ces orientations peuvent être obtenues par exemple lorsque le segment est immobile en utilisant le procédé décrit dans la demande de brevet FR 2838185. Par contre, comme cela a été montré ci-dessus, dans le cas où les moyens
15 de mesures représentatifs de l'orientation du segment de rang n sont suffisamment proches du point d'articulation p_n , il n'est pas nécessaire de connaître les deux orientations successives précédentes et le procédé est simplifié.

20 La figure 6A illustre, de façon symbolique, dans le cas particulier où les vecteurs \vec{D}_n sont considérés comme nuls, l'évolution au cours du temps des données d'accélération et d'orientation obtenues pour les différents segments d'une structure à cinq
25 segments articulés

Sur la figure 6A, l'axe horizontal représente le rang n des segments qui composent la structure et l'axe vertical représente des instants de mesure successifs t_k . A l'intersection d'un rang n et
30 d'un instant t_k sont indiquées les grandeurs (accélération et orientation) qui sont connues à

l'instant t_k , pour le segment de rang n . Ces grandeurs sont constituées de données de mesure et/ou de données déduites de données de mesure.

Afin de ne pas alourdir la figure 6A, la
 5 grandeur $d\theta_n/dt$ est représentée par le symbole $\dot{\theta}_n$ et la grandeur $d^2\theta_n/dt^2$ est représentée par le symbole $\ddot{\theta}_n$. Par ailleurs, il vient :

- $d\theta_n(t_k) = \theta_n(t_k) - \theta_n(t_{k-1})$,
- $dt(t_k) = t_k - t_{k-1}$,
- 10 - $d^2\theta_n(t_k) = d\theta_n(t_k) - d\theta_n(t_{k-1})$,
- $dt^2(t_k) = t_k - t_{k-1}$.

A l'instant t_1 , les seules grandeurs connues relatives aux segments sont les suivantes :

$$a_1(t_1), \theta_1(t_1).$$

15 Ces données sont bien sûr insuffisantes pour décrire le mouvement de la structure.

A l'instant t_2 , les grandeurs connues relatives aux segments de rangs 1 à 5 sont les suivantes :

20 $a_1(t_2), \theta_1(t_2), d\theta_1/dt(t_2).$

Ces données sont toujours insuffisantes pour décrire le mouvement de la structure.

A l'instant t_3 , les grandeurs connues relatives aux segments sont les suivantes :

- 25 - $a_1(t_3), \theta_1(t_3), d\theta_1/dt(t_3), d^2\theta_1/dt^2(t_3),$
 - $a_2(t_3), \theta_2(t_3).$

Ces données sont toujours insuffisantes pour décrire le mouvement de la structure.

A l'instant t_4 , les grandeurs connues sont
 30 les suivantes :

- $a_1(t_4), \theta_1(t_4), d\theta_1/dt(t_4), d^2\theta_1/dt^2(t_4),$

- $a_2(t_4)$, $\theta_2(t_4)$, $d\theta_2/dt(t_4)$,

Ces données sont toujours insuffisantes pour décrire le mouvement de la structure.

A l'instant t_5 , les grandeurs connues sont
5 les suivantes :

- $a_1(t_5)$, $\theta_1(t_5)$, $d\theta_1/dt(t_5)$, $d^2\theta_1/dt^2(t_5)$,

- $a_2(t_5)$, $\theta_2(t_5)$, $d\theta_2/dt(t_5)$, $d^2\theta_2/dt^2(t_5)$,

- $a_3(t_5)$, $\theta_3(t_5)$.

Ces données sont toujours insuffisantes
10 pour décrire le mouvement de la structure.

A l'instant t_6 , les grandeurs connues relatives aux segments de rangs 1 à 5 sont respectivement les suivantes :

- $a_1(t_6)$, $\theta_1(t_6)$, $d\theta_1/dt(t_6)$, $d^2\theta_1/dt^2(t_6)$,

15 - $a_2(t_6)$, $\theta_2(t_6)$, $d\theta_2/dt(t_6)$, $d^2\theta_2/dt^2(t_6)$,

- $a_3(t_6)$, $\theta_3(t_6)$, $d\theta_3/dt(t_6)$.

Ces données sont toujours insuffisantes pour décrire le mouvement de la structure.

A l'instant t_7 , les grandeurs connues
20 relatives aux segments de rangs 1 à 5 sont respectivement les suivantes :

- $a_1(t_7)$, $\theta_1(t_7)$, $d\theta_1/dt(t_7)$, $d^2\theta_1/dt^2(t_7)$,

- $a_2(t_7)$, $\theta_2(t_7)$, $d\theta_2/dt(t_7)$, $d^2\theta_2/dt^2(t_7)$,

- $a_3(t_7)$, $\theta_3(t_7)$, $d\theta_3/dt(t_7)$, $d^2\theta_3/dt^2(t_7)$,

25 - $a_4(t_7)$, $\theta_4(t_7)$.

Ces données sont toujours insuffisantes pour décrire le mouvement de la structure.

A l'instant t_8 , les grandeurs connues sont les suivantes :

30 - $a_1(t_8)$, $\theta_1(t_8)$, $d\theta_1/dt(t_8)$, $d^2\theta_1/dt^2(t_8)$,

- $a_2(t_8)$, $\theta_2(t_8)$, $d\theta_2/dt(t_8)$, $d^2\theta_2/dt^2(t_8)$,

- $a_3(t_8)$, $\theta_3(t_8)$, $d\theta_3/dt(t_8)$, $d^2\theta_3/dt^2(t_8)$,
- $a_4(t_8)$, $\theta_4(t_8)$, $d\theta_4/dt(t_8)$.

A l'instant t_9 , les grandeurs connues sont les suivantes :

- 5 - $a_1(t_9)$, $\theta_1(t_9)$, $d\theta_1/dt(t_9)$, $d^2\theta_1/dt^2(t_9)$,
- $a_2(t_9)$, $\theta_2(t_9)$, $d\theta_2/dt(t_9)$, $d^2\theta_2/dt^2(t_9)$,
- $a_3(t_9)$, $\theta_3(t_9)$, $d\theta_3/dt(t_9)$, $d^2\theta_3/dt^2(t_9)$,
- $a_4(t_9)$, $\theta_4(t_9)$, $d\theta_4/dt(t_9)$, $d^2\theta_4/dt^2(t_9)$,
- $a_5(t_9)$, $\theta_5(t_9)$.

10 Ces données permettent maintenant de décrire complètement le mouvement de la structure. Si l'on continue la représentation pour les instants ultérieurs t_{10} et t_{11} , il vient :

- à l'instant t_{10} , les grandeurs connues
15 relatives aux segments de rangs 1 à 5 sont respectivement les suivantes :

- $a_1(t_{10})$, $\theta_1(t_{10})$, $d\theta_1/dt(t_{10})$, $d^2\theta_1/dt^2(t_{10})$,
- $a_2(t_{10})$, $\theta_2(t_{10})$, $d\theta_2/dt(t_{10})$, $d^2\theta_2/dt^2(t_{10})$,
- $a_3(t_{10})$, $\theta_3(t_{10})$, $d\theta_3/dt(t_{10})$, $d^2\theta_3/dt^2(t_{10})$,
- 20 - $a_4(t_{10})$, $\theta_4(t_{10})$, $d\theta_4/dt(t_{10})$, $d^2\theta_4/dt^2(t_{10})$,
- $a_5(t_{10})$, $\theta_5(t_{10})$, $d\theta_5/dt(t_{10})$; et

- à l'instant t_{11} , les grandeurs connues relatives aux segments de rangs 1 à 5 sont respectivement les suivantes :

- 25 - $a_1(t_{11})$, $\theta_1(t_{11})$, $d\theta_1/dt(t_{11})$, $d^2\theta_1/dt^2(t_{11})$,
- $a_2(t_{11})$, $\theta_2(t_{11})$, $d\theta_2/dt(t_{11})$, $d^2\theta_2/dt^2(t_{11})$,
- $a_3(t_{11})$, $\theta_3(t_{11})$, $d\theta_3/dt(t_{11})$, $d^2\theta_3/dt^2(t_{11})$,
- $a_4(t_{11})$, $\theta_4(t_{11})$, $d\theta_4/dt(t_{11})$, $d^2\theta_4/dt^2(t_{11})$,
- $a_5(t_{11})$, $\theta_5(t_{11})$, $d\theta_5/dt(t_{11})$, $d^2\theta_5/dt^2(t_{11})$.

30 Le mouvement articulé de la structure à cinq segments est totalement défini dès lors que les

accélérations et les orientations des cinq segments (n=5) sont connues, c'est-à-dire à partir de l'instant t_9 (k=9). De même, on constate, par exemple, que pour une structure à trois segments (n=3), les accélérations et les orientations des trois segments sont connues à partir de l'instant t_5 (k=5).

Il est ainsi possible d'établir, entre le nombre entier n et le nombre entier k, une relation qui traduit le fait que le dispositif de capture de mouvement fonctionne correctement, c'est-à-dire délivre toutes les informations d'accélération et d'orientation nécessaires pour tous les segments de la structure. Cette relation s'écrit :

$$k > 2n - 2.$$

La figure 6B illustre, dans le cas général, les résultats de calculs des données d'accélération et d'orientation obtenues, de proche en proche, pour les différents segments d'une structure à segments articulés. Le calcul des données d'accélération et d'orientation est décrit ci-dessous pour les trois premiers segments.

Cas du premier segment

Dans une première étape, on utilise les mesures $a_1(t_k)$ et $M_1(t_k)$ qui correspondent respectivement à l'accélération mesurée (ou calculée) sur le segment 1 (grâce aux premiers moyens de mesure ML) et aux mesures délivrées par les seconds moyens de mesure (MD1). On utilise également les orientations $\theta_1(t_{k-1})$ et $\theta_1(t_{k-2})$ du premier segment données (ou calculées) pour les instants précédents (t_{k-1} et t_{k-2}).

Grâce à ces quatre informations on peut calculer l'orientation du segment 1 à l'instant t_k : $\theta_1(t_k)$.

Dans une deuxième étape, on utilise $a_1(t_k)$ l'accélération mesurée (ou calculée) sur le segment 1 (grâce aux premiers moyens de mesure ML), ainsi que les orientations du premier segment $\theta_1(t_k)$ calculée à l'étape précédente et $\theta_1(t_{k-1})$ et $\theta_1(t_{k-2})$ celles données (ou calculées) pour les instants précédent (t_{k-1} et t_{k-2}). On calcule avec ces grandeurs l'accélération $a_2(t_k)$ au niveau de l'articulation p2.

Cas du deuxième segment

Dans une première étape, on utilise l'accélération $a_2(t_k)$ calculée à l'étape précédente, les mesures $M_2(t_k)$ des moyens de mesures MD₂ du deuxième segment à l'instant t_k . On utilise également les orientations $\theta_2(t_{k-1})$ et $\theta_2(t_{k-2})$ du deuxième segment données (ou calculées) pour les instants précédents (t_{k-1} et t_{k-2}).

Grâce à ces quatre informations on peut calculer l'orientation du segment 1 à l'instant t_k : $\theta_1(t_k)$.

Dans une deuxième étape, on utilise $a_2(t_k)$ l'accélération calculée à la deuxième étape du premier segment, ainsi que les orientations du deuxième segment $\theta_2(t_k)$ calculée à l'étape précédente et $\theta_2(t_{k-1})$ et $\theta_2(t_{k-2})$ données (ou calculées) pour les instants précédent t_{k-1} et t_{k-2} . On calcule avec ces grandeurs l'accélération $a_3(t_k)$ au niveau de l'articulation p3.

Cas du troisième segment

On réalise les mêmes deux étapes que pour le deuxième segment en substituant l'indice 4 à l'indice 3, l'indice 3 à l'indice 2, et l'indice 2 à l'indice 1.

Il en va ainsi de suite jusqu'au Nième segment : on réalise les mêmes deux étapes que pour le deuxième segment en substituant l'indice N+1 à l'indice 3, l'indice N à l'indice 2 et l'indice N-1 à l'indice 1.

Lorsque tous les segments ont été considérés, on attend l'instant t_k suivant et on recommence.

Dans le cas général, on note que, pour connaître l'orientation estimée d'un segment à l'instant t_k , il est nécessaire de connaître les orientations estimées de ce même segment aux deux instants précédents t_{k-1} et t_{k-2} . En conséquence, pour le premier instant du calcul, il est nécessaire d'initialiser les valeurs des orientations aux instants précédents. Pour cela on pourra, par exemple, faire des mesures statiques pour lesquelles les accélérations sont faibles et peuvent en conséquence être négligées; les angles pourront alors être calculés de la manière décrite dans la demande de brevet FR 2 838 185. On peut également utiliser d'autres moyens pour initialiser les angles (codeurs angulaires, mise à une position initiale contrainte, etc.).

Les figures 7A et 7B représentent deux modes de réalisation d'un dispositif de reproduction de mouvement selon l'invention. La structure S constituée

de n segments articulés est représentée de façon symbolique par un rectangle. La structure S , par exemple un homme ou un robot, est munie d'un ensemble de dispositifs MD_i ($i=1, 2, \dots, n$) et d'un ensemble de systèmes de mesures locales ML_j ($j=1, 2, \dots, m$). Les dispositifs MD_i et les systèmes ML_j sont distribués sur la structure comme cela a été décrit précédemment. Comme décrit précédemment également, bien que m systèmes de mesures locales soient représentés sur les figures 7A et 7B, un seul système de mesures locales suffit pour mettre en œuvre l'invention.

Dans le premier mode de réalisation (figure 7A), les mesures délivrées par les dispositifs MD_i et les mesures délivrées par les systèmes de mesures locales ML_j sont transmises, par les signaux radioélectriques respectifs RD_i et RL_j , vers un système de calcul 3, par exemple un ordinateur. Le dispositif de reproduction de mouvement comprend alors des moyens de transmission radioélectrique. Le système de calcul 3 est muni d'une antenne de réception R qui reçoit les signaux RD_i et RL_j . Le système de calcul 3 reçoit, par ailleurs, comme paramètres d'entrée, la valeur G du champ de gravitation local dans le repère de référence, la valeur H du champ magnétique local dans le repère de référence, et les coordonnées des différents vecteurs \vec{L}_i ($i=1, 2, \dots, n$) qui représentent les différents segments.

Le système de calcul 3 met alors en œuvre un traitement des données conforme à ce qui a été décrit ci-dessus en référence aux figures 5 et 6. Un dispositif d'affichage E , par exemple un écran, permet

alors de visualiser le mouvement de la structure articulée.

La figure 7B diffère de la figure 7A en ce que les signaux radioélectriques RD_i et RL_j ne sont pas ici directement transmis au système de calcul 3 mais sont transmis à une unité intermédiaire DEM fixée sur la structure S. L'unité DEM transmet alors les données qu'elle reçoit sous la forme d'un signal radioélectrique RF au système de calcul 3.

La présence d'une unité intermédiaire DEM sur la structure S permet avantageusement de mettre en œuvre un autre mode de réalisation de l'invention. En effet, dans le cas où la structure S se meut à une grande distance du système de calcul 3, il est possible que la portée du signal RF se détériore. Une carte mémoire placée dans l'unité intermédiaire DEM peut alors enregistrer les signaux RD_i et RL_j . Le traitement des données peut alors être effectué postérieurement à la capture des mesures, une fois le mouvement exécuté, à partir de la lecture des données enregistrées sur la carte mémoire.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif de capture de mouvement d'une structure constituée de N segments solides successifs articulés les uns par rapport aux autres à partir d'un segment de rang 1 jusqu'à un segment de rang N, N étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, le segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) étant articulé avec le segment de rang n-1 au niveau d'un point d'articulation p_n ,
10 caractérisé en ce qu'il comprend :

- des premiers moyens (ML) qui délivrent une information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 d'un point du segment de rang 1 dans un repère de référence, à des instants successifs t_k , k étant un nombre entier supérieur ou égal à 1,

- des seconds moyens de mesure (MD_1) fixés sur le segment de rang 1 et qui délivrent, à chaque instant t_k , une mesure (M_1) représentative d'un vecteur orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de rang 1 dans le repère de référence, et

- des moyens de mesure supplémentaires (MD_n) fixés sur chaque segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) et qui délivrent, à chaque instant t_k , une mesure représentative d'un vecteur orientation $\vec{\Theta}_n$ du segment de rang n.

2. Dispositif de capture de mouvement selon la revendication 1, dans lequel les seconds moyens de mesure (MD_1) et les moyens de mesure supplémentaires (MD_n) sont constitués d'un accéléromètre et d'un

capteur qui délivre une mesure d'un champ physique uniforme présent dans l'espace où se meut la structure et de direction connue dans le repère de référence.

5 3. Dispositif de capture de mouvement selon la revendication 2, dans lequel les seconds moyens de mesure (MD_1) et les moyens de mesure supplémentaires (MD_n) comprennent, en outre, au moins un axe gyrométrique.

10 4. Dispositif de capture de mouvement selon l'une quelconque des revendication 2 ou 3, dans lequel le capteur qui délivre une mesure d'un champ physique uniforme de direction connue dans le repère de
15 référence est un magnétomètre.

 5. Dispositif de capture de mouvement selon l'une quelconque des revendications 2 ou 3, dans lequel le capteur qui délivre une mesure d'un champ physique
20 uniforme de direction connue dans le repère de référence est une cellule photoélectrique.

 6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les premiers
25 moyens (ML) sont des moyens de mesure constitués d'un mesureur de vitesse de sorte que la donnée apte à restituer un vecteur d'accélération absolue du segment de rang 1 est la vitesse du point.

30 7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel les premiers moyens

(ML) sont des moyens de mesure constitués d'un mesureur de position de sorte que la donnée apte à restituer un vecteur d'accélération absolue d'un point du segment de rang 1 est la position du point.

5

8. Dispositif de reproduction de mouvement d'une structure constituée de N segments solides successifs articulés les uns par rapport aux autres à partir d'un segment de rang 1 jusqu'à un segment de rang N, N étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, le segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) étant articulé avec le segment de rang n-1 au niveau d'un point d'articulation p_n , caractérisé en ce qu'il comprend :

- un dispositif de capture de mouvement selon l'une quelconque des revendications 1 à 7 dans lequel les moyens de mesure supplémentaires (MD_n) d'un segment de rang n sont positionnés à proximité du point d'articulation p_n de telle sorte que la distance qui sépare les moyens de mesure supplémentaire (MD_n) d'un segment de rang n du point d'articulation p_n est considérée comme nulle, et

- des moyens de calcul (3) qui calculent, à chaque instant t_k :

a) le vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 dans le repère de référence, à partir de l'information délivrée par les premiers moyens,

b) le vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de rang 1 dans le repère de référence, à partir du vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 et de la mesure représentative (M_1) du vecteur orientation ($\vec{\Theta}_1$) du segment de rang 1 ;

c) un vecteur d'accélération \vec{a}_n ($n \geq 2$) du point d'articulation p_n dans le repère de référence, à partir de l'équation :

$$\vec{a}_n = \vec{a}_{n-1} + \left(\frac{d\vec{\omega}_{n-1}}{dt} \right) \wedge \vec{L}_{n-1} + \vec{\omega}_{n-1} \wedge (\vec{\omega}_{n-1} \wedge \vec{L}_{n-1})$$

5 où $\vec{\omega}_n = d(\vec{\Theta}_n)/dt$ et \vec{L}_n étant un vecteur orienté du point d'articulation p_{n-1} vers le point d'articulation p_n et dont le module a pour valeur la distance qui sépare le point d'articulation p_n du point d'articulation p_{n-1} ; et

10 d) le vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_n$ ($n \geq 2$) du segment de rang n à partir du vecteur d'accélération \vec{a}_n et de la mesure représentative (M_n) de l'orientation du segment de rang n .

15 9. Dispositif de reproduction de mouvement d'une structure constituée de N segments solides successifs articulés les uns par rapport aux autres à partir d'un segment de rang 1 jusqu'à un segment de rang N , N étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, 20 le segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) étant articulé avec le segment de rang $n-1$ au niveau d'un point d'articulation p_n , caractérisé en ce qu'il comprend :

- un dispositif de capture de mouvement selon l'une quelconque des revendications 1 à 7 dans 25 lequel les moyens de mesure supplémentaires (MD_n) d'un segment de rang n sont distants du point d'articulation p_n , et

- des moyens de calcul (3) qui calculent, à chaque instant t_k :

a) le vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 dans le repère de référence, à partir de l'information délivrée par les premiers moyens,

b) le vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de rang 1 dans le repère de référence, à partir du vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 et de la mesure représentative (M_1) du vecteur orientation ($\vec{\Theta}_1$) du segment de rang 1 ;

c) un vecteur d'accélération \vec{a}_n ($n \geq 2$) du point d'articulation p_n dans le repère de référence, à partir de l'équation :

$$\vec{a}_n = \vec{a}_{n-1} + \left(\frac{d\vec{\omega}_{n-1}}{dt} \right) \wedge \vec{L}_{n-1} + \vec{\omega}_{n-1} \wedge (\vec{\omega}_{n-1} \wedge \vec{L}_{n-1})$$

où $\vec{\omega}_n = d(\vec{\Theta}_n)/dt$, \vec{L}_n étant un vecteur orienté du point d'articulation p_{n-1} vers le point d'articulation p_n et dont le module a pour valeur la distance qui sépare le point d'articulation p_n du point d'articulation p_{n-1} ; et

d) le vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_n$ ($n \geq 2$) et un vecteur d'accélération \vec{b}_n du point de mesure des moyens de mesure supplémentaire fixés sur le segment de rang n à partir du vecteur d'accélération \vec{a}_n , de la mesure représentative (M_n) de l'orientation du segment de rang n , et des vecteurs d'orientation du segment de rang n à au moins deux instants qui précèdent l'instant t_k , avec \vec{b}_n tel que :

$$\vec{b}_n = \vec{a}_n + \left(\frac{d\vec{\omega}_n}{dt} \right) \wedge \vec{D}_n + \vec{\omega}_n \wedge (\vec{\omega}_n \wedge \vec{D}_n)$$

où \vec{D}_n est un vecteur orienté du point d'articulation p_n vers les moyens de mesure

supplémentaires du segment de rang n et dont le module est sensiblement égal à la distance qui sépare le point d'articulation p_n des moyens de mesure supplémentaires du segment de rang n .

5

10. Dispositif de reproduction de mouvement selon l'une quelconque des revendications 8 ou 9, dans lequel des moyens de transmission radioélectrique transmettent des signaux électriques élémentaires (RD_n , RL_m) représentatifs des mesures délivrées par les premiers moyens de mesure (ML) et les seconds moyens de mesure (MD_n) vers les moyens de calcul (3).

11. Dispositif de reproduction de mouvement selon la revendication 10, dans lequel les moyens de transmission comprennent une unité intermédiaire (DEM) qui reçoit les signaux électriques élémentaires (RD_1 , ..., RD_x , RL_1 , ..., RL_y) et qui réémet un signal électrique (RF) représentatif des signaux électriques élémentaires vers les moyens de calcul (3).

12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel des moyens de mémorisation mémorisent les mesures délivrées par les premiers moyens de mesure (ML) et les seconds moyens de mesure (MD_n).

13. Dispositif selon la revendication 12, dans lequel les moyens de mémorisation sont placés sur la structure.

14. Procédé de capture de mouvement d'une structure constituée de N segments solides successifs articulés les uns par rapport aux autres à partir d'un segment de rang 1 jusqu'à un segment de rang N, N étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, le segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) étant articulé avec le segment de rang n-1 au niveau d'un point d'articulation p_n , caractérisé en ce qu'il comprend :

- au moins une détermination d'une information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 d'un point du segment de rang 1 dans un repère de référence, à des instants successifs t_k , k étant un nombre entier supérieur ou égal à 1,

- au moins une mesure représentative d'un vecteur orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de rang 1 dans le repère de référence, à chacun des instant successifs t_k , et

- pour chaque segment de rang n, au moins une mesure supplémentaire d'un vecteur orientation $\vec{\Theta}_n$ du segment de rang n dans le repère de référence, à chacun des instant successifs t_k .

15. Procédé de capture de mouvement selon la revendication 14, dans lequel la mesure représentative du vecteur orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de rang 1 dans le repère de référence et la mesure représentative du vecteur orientation $\vec{\Theta}_n$ du segment de rang n sont, chacune, une mesure d'un champ uniforme présent dans l'espace où se meut la structure et de direction connue dans le repère de référence.

16. Procédé de capture de mouvement selon la revendication 14 ou 15, dans lequel l'information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 d'un point du segment de rang 1 dans un repère de référence est la vitesse du point dans le repère de référence.

17. Procédé de capture de mouvement selon la revendication 14 ou 15, dans lequel l'information apte à restituer un vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 d'un point du segment de rang 1 dans un repère de référence est la position du point dans le repère de référence.

18. Procédé de reproduction de mouvement d'une structure constituée de N segments solides successifs articulés les uns par rapport aux autres à partir d'un segment de rang 1 jusqu'à un segment de rang N, N étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, le segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) étant articulé avec le segment de rang n-1 au niveau d'un point d'articulation p_n , caractérisé en ce qu'il met en œuvre :

- un procédé de capture de mouvement selon l'une quelconque des revendications 14 à 17, et
- un calcul, à chaque instant t_k :
 - a) du vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 dans le repère de référence, à partir de la mesure apte à restituer un vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 ,

b) du vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment de rang 1 dans le repère de référence, à partir du vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 et de la mesure représentative (M_1) du vecteur orientation ($\vec{\Theta}_1$) du segment de rang 1 ;

c) d'un vecteur d'accélération \vec{a}_n ($n \geq 2$) du point d'articulation p_n dans le repère de référence, à partir de l'équation :

$$\vec{a}_n = \vec{a}_{n-1} + \left(\frac{d\vec{\omega}_{n-1}}{dt} \right) \wedge \vec{L}_{n-1} + \vec{\omega}_{n-1} \wedge (\vec{\omega}_{n-1} \wedge \vec{L}_{n-1})$$

où $\vec{\omega}_n = d(\vec{\Theta}_n)/dt$, \vec{L}_n étant un vecteur orienté du point d'articulation p_{n-1} vers le point d'articulation p_n et dont le module a pour valeur la distance qui sépare le point d'articulation p_n du point d'articulation p_{n-1} , la mesure supplémentaire représentative du vecteur orientation $\vec{\Theta}_n$ étant délivrée par des moyens de mesure fixés, sur le segment de rang n , sensiblement au niveau du point d'articulation p_n ; et

d) d'un vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_n$ ($n \geq 2$) du segment de rang n à partir du vecteur d'accélération \vec{a}_n et de la mesure représentative (M_n) de l'orientation du segment de rang n .

19. Procédé de reproduction de mouvement d'une structure constituée de N segments solides successifs articulés les uns par rapport aux autres à partir d'un segment de rang 1 jusqu'à un segment de rang N , N étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, le segment de rang n ($n = 2, \dots, N$) étant articulé avec

le segment de rang $n-1$ au niveau d'un point d'articulation p_n , caractérisé en ce qu'il comprend :

- un procédé de capture de mouvement selon l'une quelconque des revendications 14 à 17 ; et

5 - un calcul, à chaque instant t_k :

a) du vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 dans le repère de référence, à partir de l'information délivrée par les premiers moyens,

b) du vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_1$ du segment
10 de rang 1 dans le repère de référence, à partir du vecteur d'accélération absolue \vec{a}_1 et de la mesure représentative (M_1) du vecteur orientation ($\vec{\Theta}_1$) du segment de rang 1 ;

c) un vecteur d'accélération \vec{a}_n ($n \geq 2$) du
15 point d'articulation p_n dans le repère de référence, à partir de l'équation :

$$\vec{a}_n = \vec{a}_{n-1} + \left(\frac{d\vec{\omega}_{n-1}}{dt} \right) \wedge \vec{L}_{n-1} + \vec{\omega}_{n-1} \wedge (\vec{\omega}_{n-1} \wedge \vec{L}_{n-1})$$

où $\vec{\omega}_n = d(\vec{\Theta}_n)/dt$, \vec{L}_n étant un vecteur orienté du point d'articulation p_{n-1} vers le point d'articulation p_n et
20 dont le module a pour valeur la distance qui sépare le point d'articulation p_n du point d'articulation p_{n-1} ; et

d) le vecteur d'orientation $\vec{\Theta}_n$ ($n \geq 2$) et un vecteur d'accélération \vec{b}_n du point de mesure des moyens de mesure supplémentaire fixés sur le segment de
25 rang n à partir du vecteur d'accélération \vec{a}_n , de la mesure représentative (M_n) de l'orientation du segment de rang n , et des vecteurs d'orientation du segment de

rang n à au moins deux instants qui précèdent l'instant t_k , avec \vec{b}_n tel que :

$$\vec{b}_n = \vec{a}_n + \left(\frac{d\vec{\omega}_n}{dt} \right) \wedge \vec{D}_n + \vec{\omega}_n \wedge (\vec{\omega}_n \wedge \vec{D}_n)$$

où \vec{D}_n est un vecteur orienté du point
 5 d'articulation p_n vers les moyens de mesure
 supplémentaires du segment de rang n et dont le module
 est sensiblement égal à la distance qui sépare le point
 d'articulation p_n des moyens de mesure supplémentaires
 du segment de rang n.

1 / 9

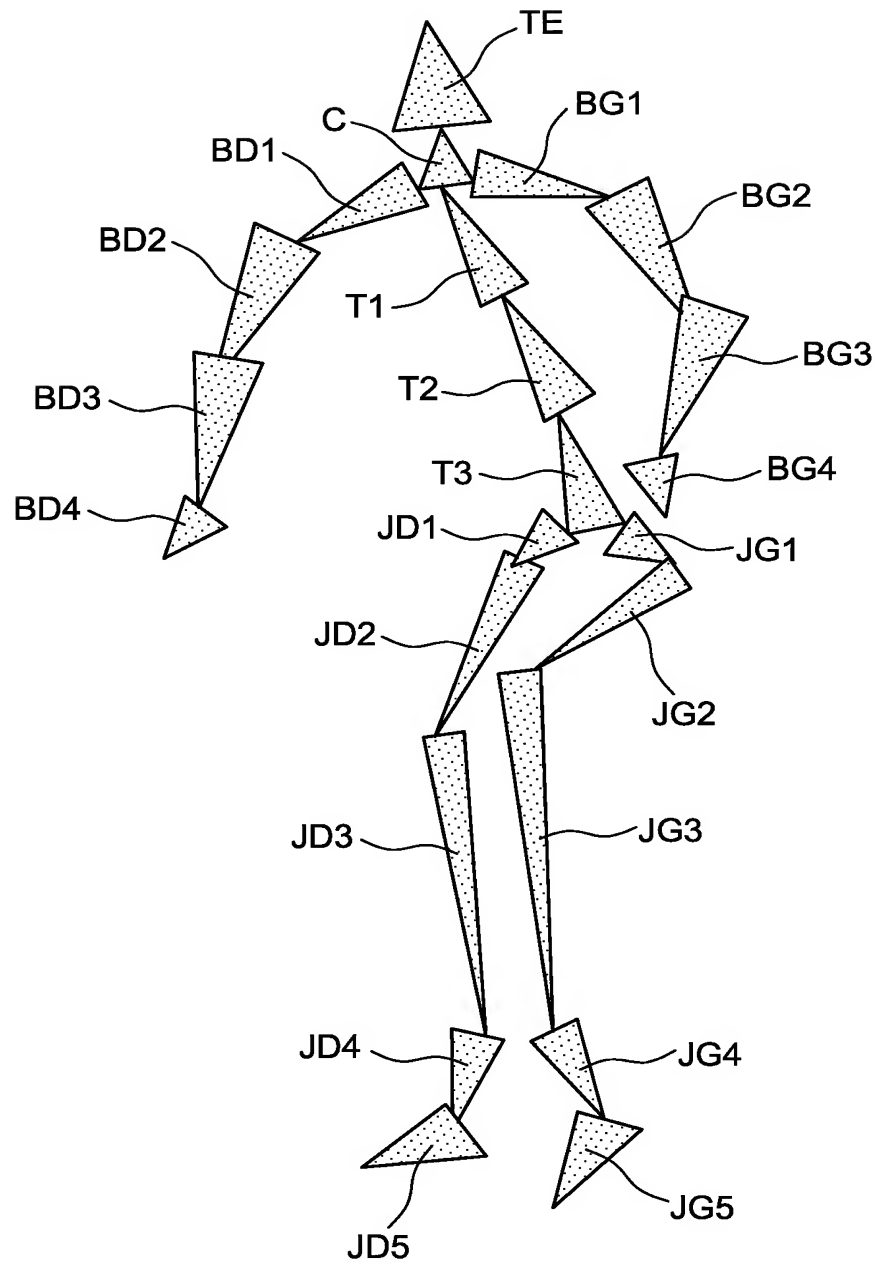


FIG. 1

2 / 9

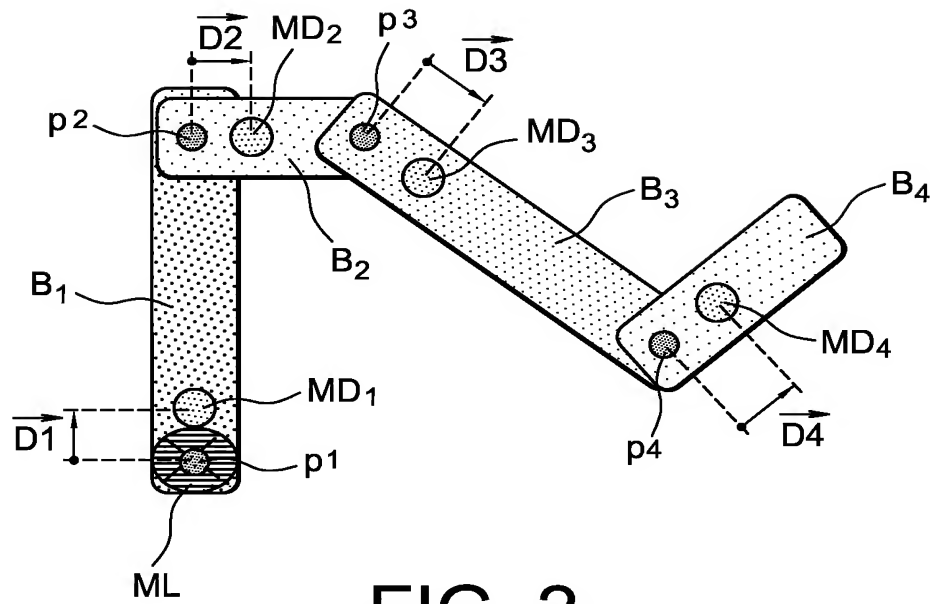


FIG. 2

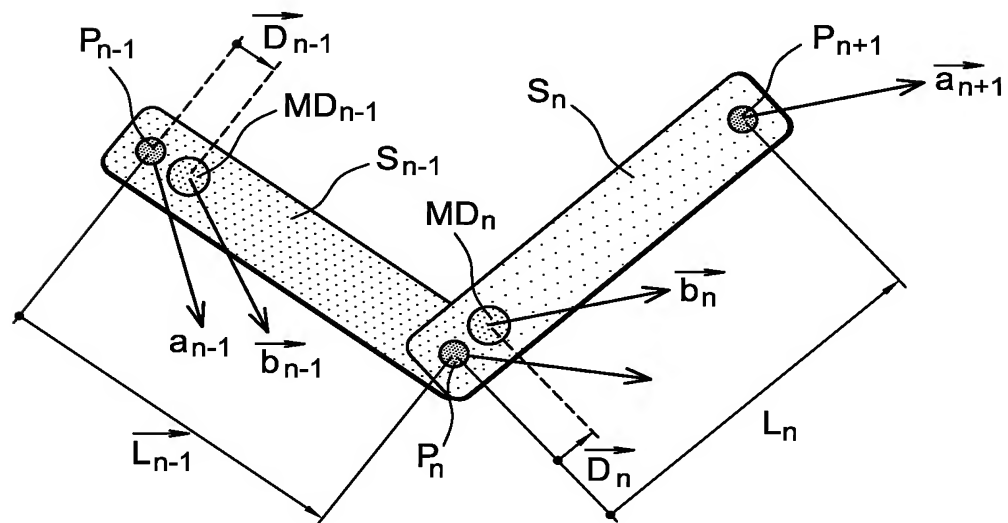
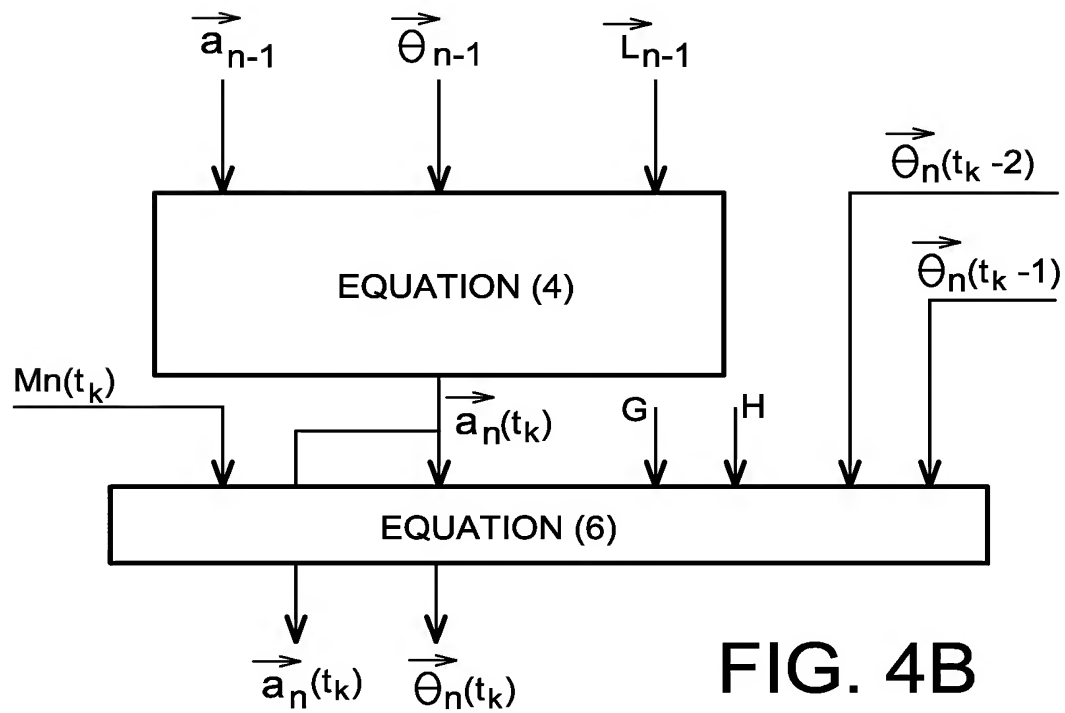
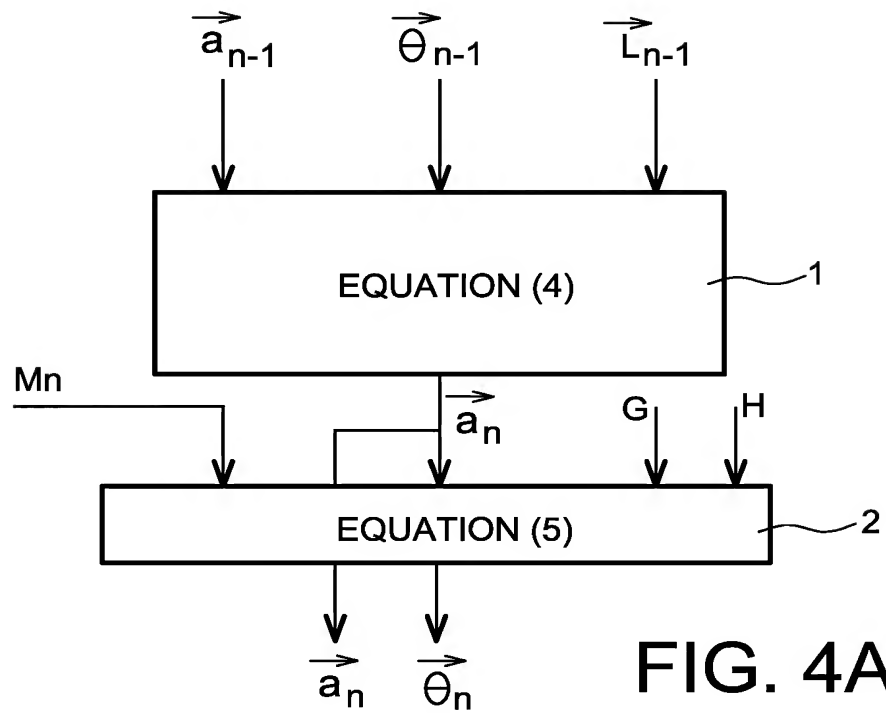


FIG. 3

3 / 9



4 / 9

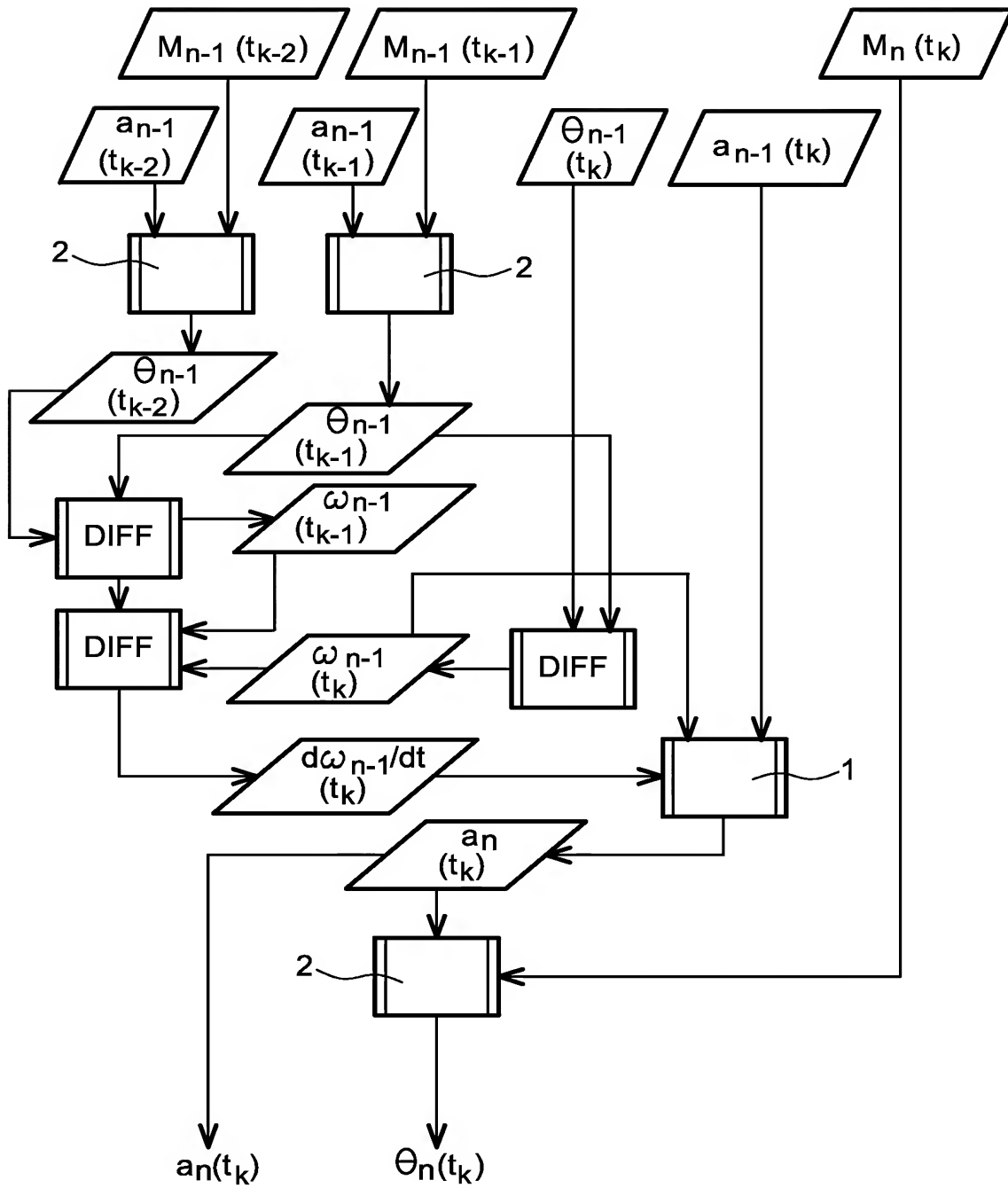


FIG. 5A

5 / 9

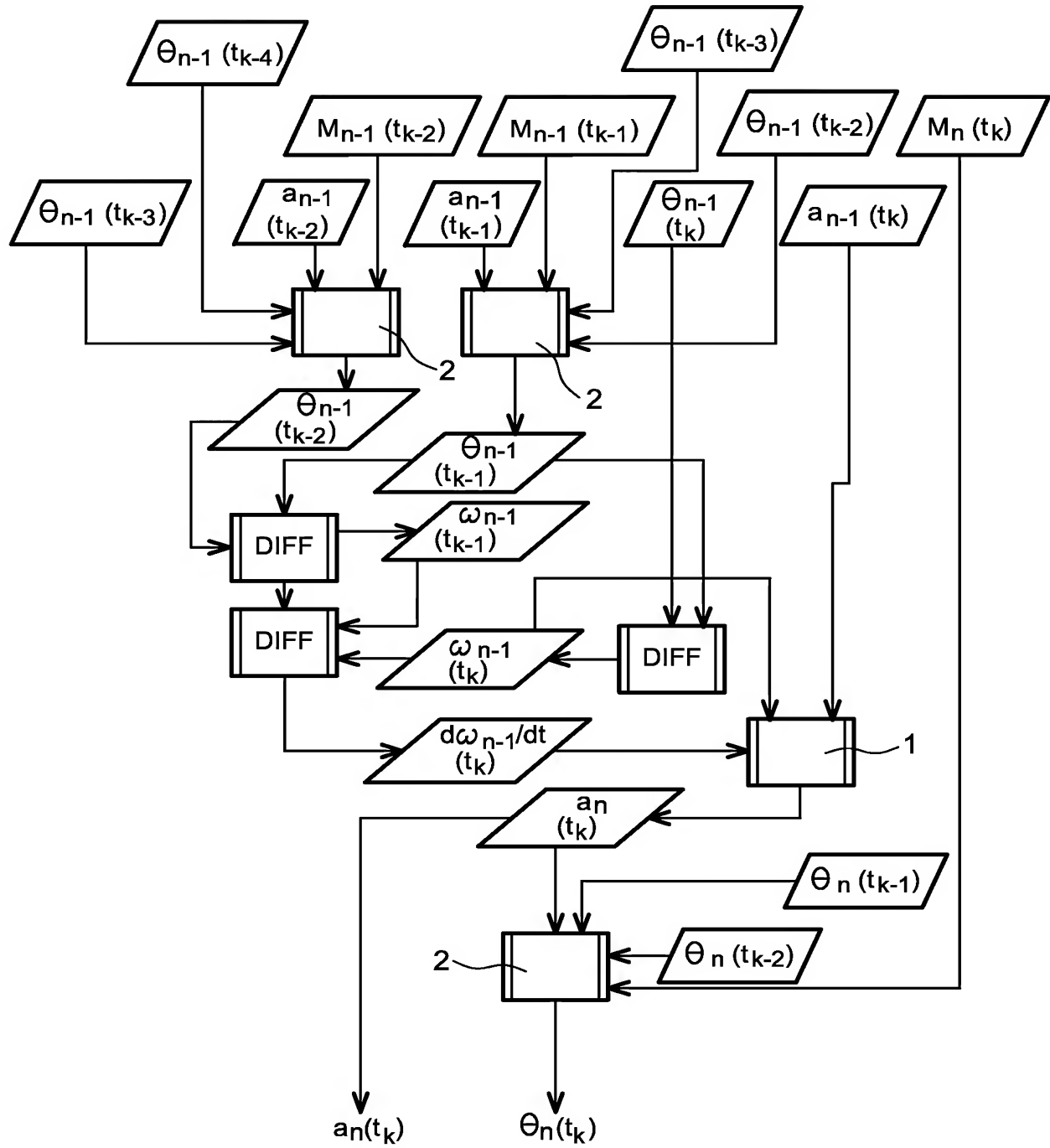
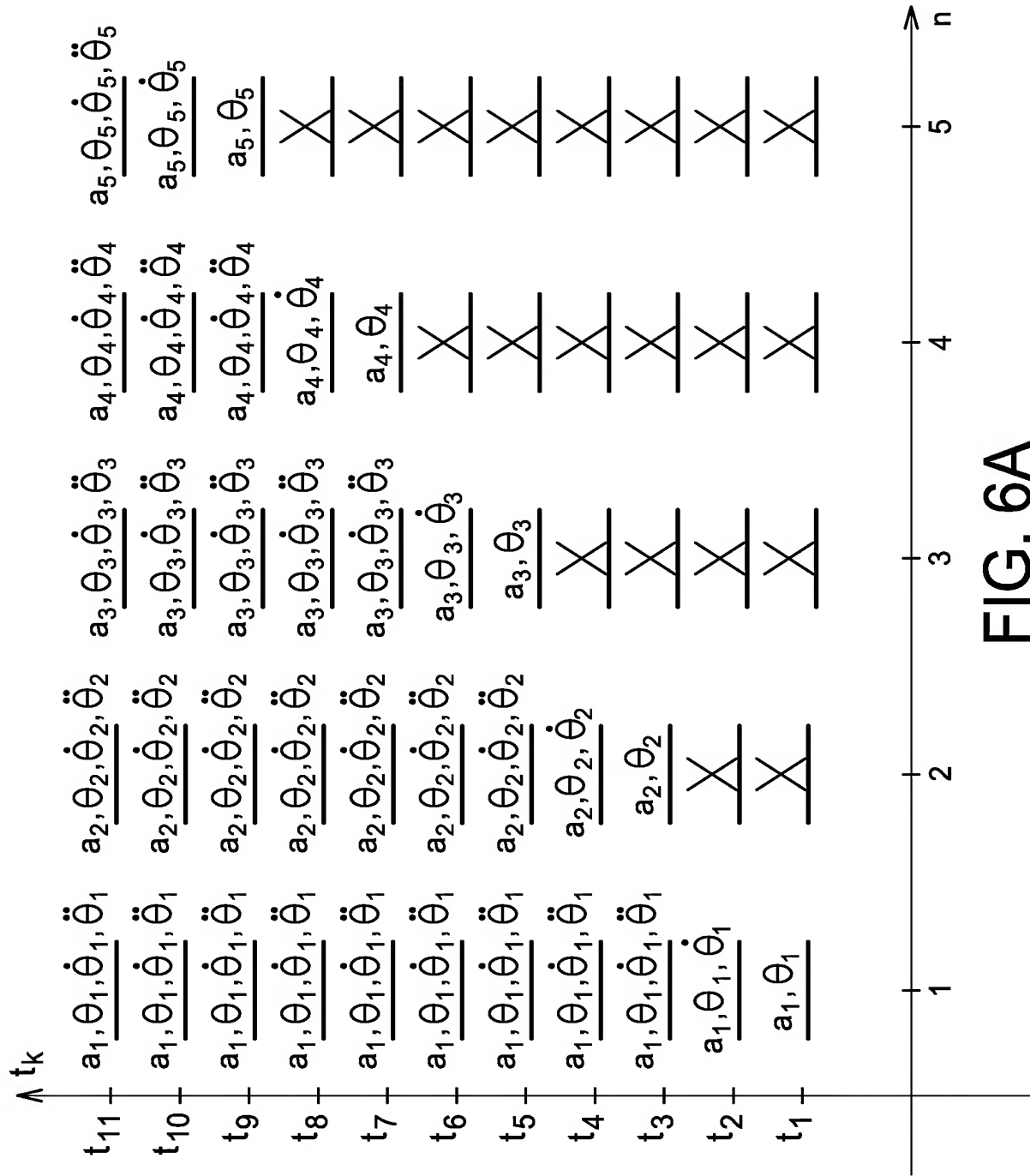


FIG. 5B



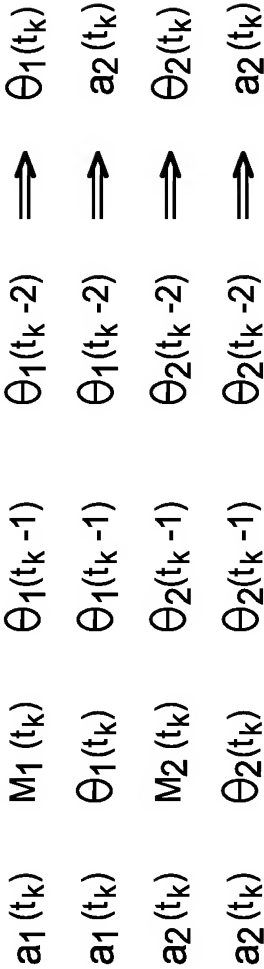


FIG. 6B

8 / 9

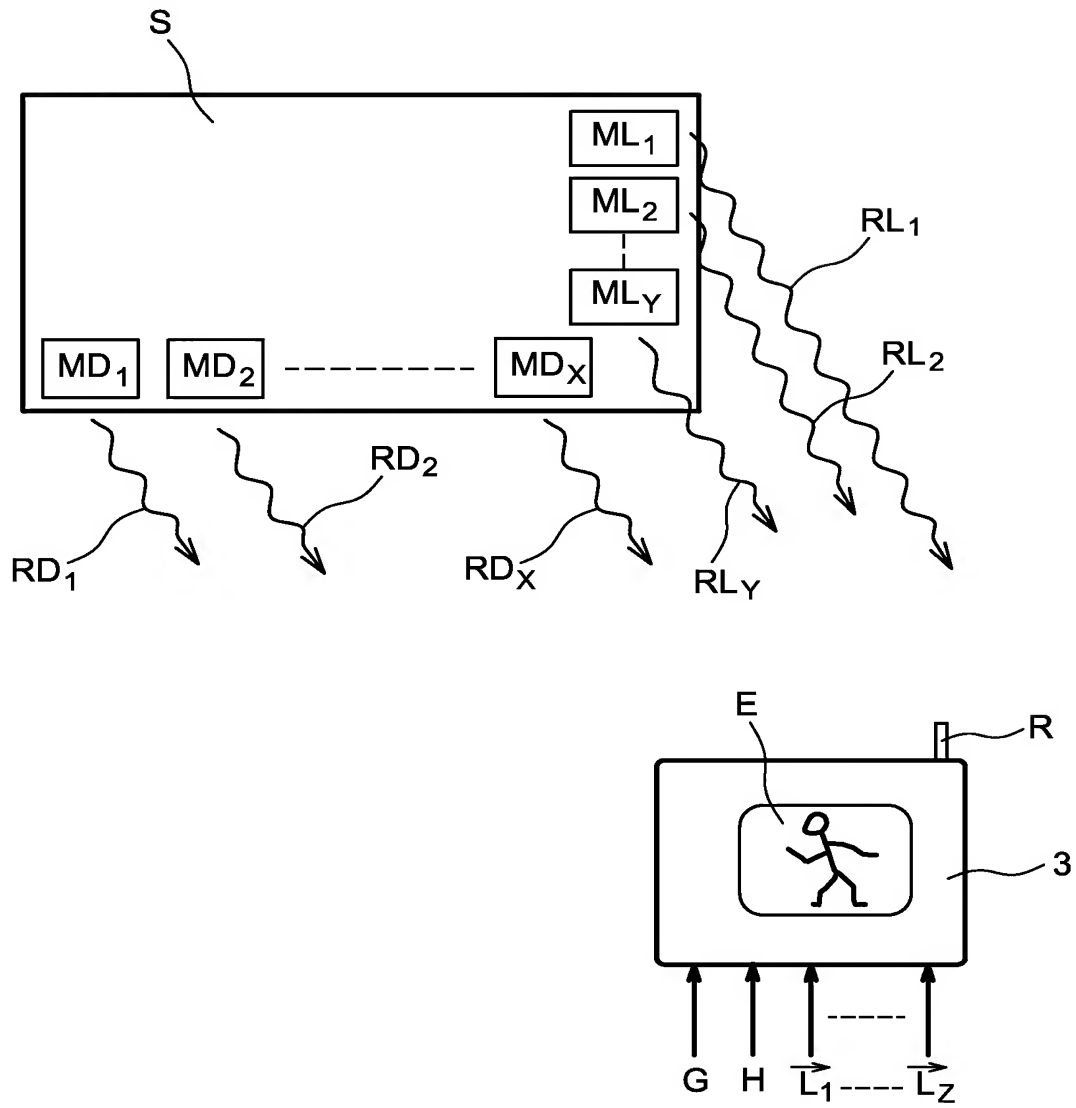


FIG. 7A

9 / 9

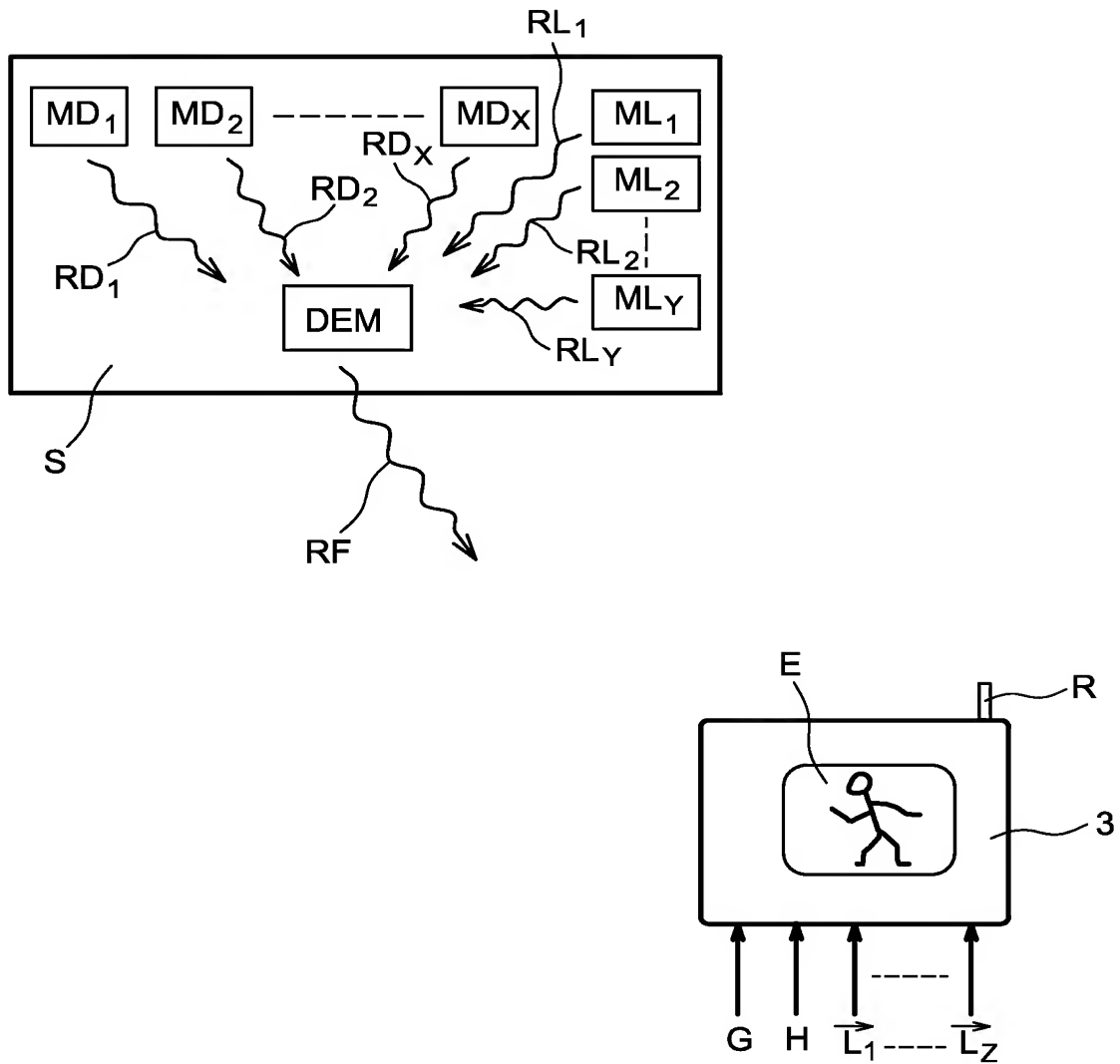


FIG. 7B